

Document downloaded from the institutional repository of the University of Alcalá: <http://dspace.uah.es/dspace/>

This is a postprint version of the following published document:

ZALACÁIN, D., SASTRE-MERLÍN, A., MARTÍNEZ-PÉREZ, S., ÁLVAREZ-GUERRA, R. and BIENES, R., 2017. "Efectos del riego de parques urbanos con agua regenerada sobre la tasa de infiltración y la resistencia a la penetración del suelo". In *Estudios en la Zona No Saturada del suelo. Vol. XIII. ZNS'17: Zaragoza, 8-10 noviembre 2017*. Ed. by MORET-FERNÁNDEZ, D. and LÓPEZ, M.V. [Zaragoza]: CSIC, Universidad de Zaragoza, pp. 175-184

*(Article begins on next page)*



This work is licensed under a

Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives  
4.0 International License.

# EFFECTOS DEL RIEGO DE PARQUES URBANOS CON AGUA REGENERADA SOBRE LA TASA DE INFILTRACIÓN Y LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL SUELO

D. Zalacáin<sup>1</sup>, A. Sastre-Merlín<sup>1</sup>, S. Martínez-Pérez<sup>1</sup>, R. Álvarez-Guerra<sup>1</sup>, R. Bienes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Alcalá. 28871, Alcalá de Henares (Madrid)  
[david.zalacain@uah.es](mailto:david.zalacain@uah.es), [antonio.sastre@uah.es](mailto:antonio.sastre@uah.es), [silvia.martinez@uah.es](mailto:silvia.martinez@uah.es), [raquelalvz@gmail.com](mailto:raquelalvz@gmail.com)

<sup>2</sup>Instituto Madrileño de Investigación, Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA). 28800, Alcalá de Henares (Madrid)  
[ramon.bienes@madrid.org](mailto:ramon.bienes@madrid.org)

**RESUMEN.** La ciudad de Madrid utiliza agua regenerada para el riego de sus parques y zonas verdes desde el año 2002. Este tipo de agua de riego, más mineralizada que el agua potable hasta entonces empleada, puede conllevar cambios en las características estructurales del suelo. En este trabajo se evalúa el efecto del riego con agua regenerada sobre la tasa de infiltración y la resistencia a la penetración del suelo en uno de estos parques (Parque Garrigues Walker). Para ello se han habilitado dos parcelas experimentales: AP, regada con agua potable y AR, regada con agua regenerada. Los resultados han revelado diferencias significativas tanto en las velocidades de infiltración como en la resistencia a la penetración del suelo. Observándose en la parcela regada con agua regenerada una disminución de la velocidad de infiltración, lo que puede estar provocado por un taponamiento de poros por la mayor presencia de sodio en el agua regenerada y una mayor resistencia a la penetración, debido a la mayor presencia de biomasa en PGW-AR.

**ABSTRACT.** The city of Madrid uses reclaimed water to irrigate its parks and green areas since 2002. This kind of water, more mineralized than drinking water previously used, could imply changes on the structural soil features. The main aim of this study has been to assess the impact of reclaimed water on infiltration rate and soil penetration resistance in one of these parks (Garrigues Walker Park). For that purpose, two plots have been selected: one irrigated by reclaimed water and the other by drinking water. Results have shown significant differences on infiltration rates as well as on soil penetration resistances. The plot irrigated by reclaimed water has evidenced a decrease on infiltration rate, which could be caused by soil pores clogging as a result of the larger amount of sodium contained in reclaimed water, and an increase of soil penetration resistance, due to the higher presence of biomass in this plot.

## 1.- Introducción

El incremento de la presión sobre el recurso hídrico, así como una disminución de la cantidad de agua disponible ha llevado a muchos países, entre ellos determinadas áreas de

España, a sufrir situaciones de estrés hídrico (Kirhensteine et al. 2016). Esta situación ha provocado una búsqueda de alternativas a los recursos hídricos tradicionales, siendo el uso de agua regenerada uno de los de mayor proyección de cara al futuro (Sastre Merlín et al. 2016), que será clave en zonas que sufran un elevado estrés hídrico (Asano & Levine 1996; Hochstrat et al. 2006).

A nivel global, una gran parte del agua que es regenerada mediante la reutilización de aguas residuales, se destina al riego agrícola (Ali et al. 2013). Sin embargo, hay algunas zonas y ciudades del mundo que destinan este recurso al riego de parques y jardines urbanos, como, por ejemplo: Pekín-China (Yi et al. 2011; Chen et al. 2013), Tokio-Japón (Furumai 2008), Denver y San Diego-EEUU (Qian & Mecham 2005; San Diego City Council, 2017), Adelaida y Victoria-Australia (Nouri et al. 2013; Han et al. 2016) y Madrid-España (Sastre Merlín et al. 2011).

Desde el inicio del presente siglo, el Ayuntamiento de Madrid ha venido sustituyendo el tradicional riego con agua potable por el riego con agua regenerada en la mayoría de sus zonas verdes, reservando así un elevado volumen de agua potable a otros usos que requieran de una mayor calidad (Martínez-Pérez et al. 2015). En la actualidad son ya 28 los parques regados con agua procedente de las 8 estaciones regeneradoras de aguas de la ciudad de Madrid, además de toda la red de distribución de este tipo de agua, la llamada “M-40 del agua” (Ayuntamiento de Madrid, 2016). En cuanto a los datos, en el año 2015 fueron reutilizados 6.6 hm<sup>3</sup> de aguas residuales depuradas, un 78% fue destinado a riego de jardines y zonas deportivas y de ocio, mientras que el 22% restante se utilizó para limpieza del alcantarillado y baldeo de calles (Zalacáin et al. 2016).

Entre los beneficios que conlleva el uso de este tipo de agua, hay que destacar el incremento neto de recursos hídricos de mayor calidad para reservarlos a abastecimiento humano, así como la mayor disponibilidad de agua potable en los periodos de sequía (Iglesias Esteban & Ortega de Miguel 2008) y una mayor seguridad de riego de los parques urbanos en estos periodos (Sastre Merlín et al. 2016). Por el contrario, es necesario tener en cuenta las posibles desventajas derivadas del uso de este tipo de agua

para el riego, principalmente en lo relacionado con su diferente composición físico-química respecto al agua potable usada normalmente para riego (Coppola et al. 2004). Numerosos autores han puesto de manifiesto los efectos que provoca el uso del agua regenerada sobre el suelo, destacando el incremento en la salinidad y en la concentración de los iones sodio y cloruro (Biggs & Jiang 2009; Lado et al. 2012) así como de algunos metales pesados (Cd, Cu, Mn y Zn) (Kim et al. 2015; Farahat & Linderholm 2015).

La introducción de este tipo de agua de riego, mucho más mineralizada que el agua potable, puede conllevar riesgos asociados a cambios en algunas propiedades físicas del suelo. Una de ellas es la infiltración, que se define como el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de la superficie de la tierra y queda retenida por él o alcanza un nivel freático (Custodio & Llamas 1983). Dicha infiltración se ve afectada por diversos factores relacionados con las características del terreno o medio permeable y las características del fluido (Porta et al. 1994). Uno de los factores que van a tener consecuencias desfavorables en la relación suelo-planta, es el exceso de sodio en el suelo, ya que puede causar la dispersión de las arcillas con la consiguiente destrucción de la estructura del suelo (Walker & Lin 2008) con perjuicio para el drenaje y la aireación, al reducir la infiltración y la conductividad hidráulica del mismo (Bagarello et al., 2006).

El objetivo de este estudio es analizar los efectos del riego con agua regenerada en la velocidad de infiltración y en la resistencia a la penetración del suelo en el Parque Garrigues Walker de la ciudad de Madrid.

## 2.- Material y métodos

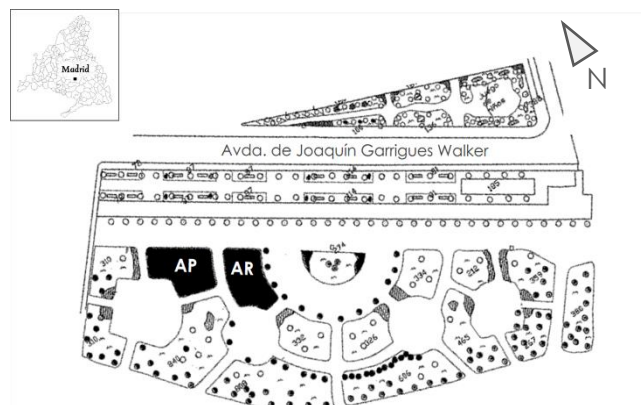
### 2.1. Área de estudio

Este trabajo se ha llevado a cabo en el Parque Garrigues Walker (PGW: 40° 22' 11" N, 3° 39' 41" W). La precipitación media anual es de 407 mm y la temperatura media anual 15.4°C (período 2001-2016) (AEMET, 2017).

El PGW comenzó a regarse con agua regenerada en el año 2012, sustituyendo al agua potable con la que se venía regando. Se dispone de dos parcelas experimentales próximas con iguales características edáficas. La superficie de la parcela regada con agua regenerada (PGW\_AR) es de 382 m<sup>2</sup> y la regada con agua potable (PGW\_AP) de 415 m<sup>2</sup>. Esta última es el control (Figura 1). La textura del suelo en ambas parcelas para los primeros 60 cm es franco-arcillo-arenosa según la clasificación USDA.

### 2.2. Ensayos de infiltración

Para evaluar la infiltración se ha utilizado un anillo simple de 12 cm Ø (USDA, 2001) y se han hecho cinco repeticiones en cada tratamiento.



**Fig. 1.** Localización del parque Garrigues Walker (PGW) y de sus parcelas: PGW\_AP y PGW\_AR.

Previo a la realización de los ensayos (Figura 2), ha sido retirada la cubierta vegetal del suelo y se ha registrado el tiempo que tardan en infiltrarse 25 mm de agua, repitiéndolo 10 veces, con el fin de alcanzar en el suelo su capacidad de retención y obtener la tasa de infiltración constante.



**Fig. 2.** Detalle de uno de los ensayos de infiltración.

### 2.3. Ensayos de resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración del suelo ha sido evaluada usando un penetrómetro manual Eijkelkamp (Mod.06.01). Se han realizado 10 repeticiones en cada tratamiento, registrándose las lecturas para las siguientes profundidades: 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 cm.

## 2.4. Análisis estadístico de los datos

Para identificar las diferencias significativas entre cada variable de estudio se ha realizado el test U de Mann-Whitney ( $P < 0.05$ ). Previamente se había ejecutado la prueba Shapiro-Wilk al objeto de confirmar que los datos no seguían una distribución normal. Todos los análisis estadísticos han sido realizados con el programa IBM SPSS, versión 22.0 (Armonk, NY: IBM Corp.).

## 3.- Resultados y discusión

### 3.1. Infiltración

La Figura 3 muestra las curvas de infiltración media de todos los ensayos para cada uno de los tratamientos. Se observa un patrón bastante similar, aunque conforme pasa el tiempo del ensayo y, una vez alcanzada la tasa de infiltración constante, ésta es ligeramente inferior en PGW\_AR.

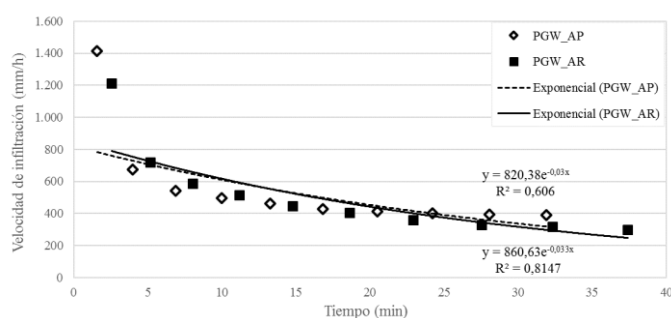


Fig. 3. Velocidad de infiltración (mm/h) en las parcelas de estudio.

Se han encontrado diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) para las velocidades de infiltración en la parcela regada con agua potable frente a la regada con agua regenerada, siendo superiores en la primera. La velocidad de infiltración media para el tratamiento AP fue de  $392 \pm 16$  mm/h, mientras que para AR fue de  $296 \pm 40$  mm/h (Figura 4).

Estos resultados coinciden con los descritos por Bedbabis et al. (2014), en su estudio también observaron un descenso significativo de la velocidad de infiltración después de 4 años de riego con agua regenerada. Hay que destacar que en este estudio se utilizó un infiltrómetro de anillo doble. Esta disminución en la velocidad de infiltración también ha sido descrita por otros autores como (Lado et al. 2005; SouDakouré et al. 2013). Una de las causas para el descenso en la tasa de infiltración es la alta proporción de sodio en relación con el calcio, que presenta el agua regenerada de este estudio. El sodio tiende a acumularse en las primeras capas del suelo, haciendo que se dispersen los agregados del suelo y obturando los poros (Balairón, 2002). En suelos arenosos, el descenso de la tasa de infiltración es

debido a la formación de un sellado, debido principalmente por la dispersión de las arcillas y el taponamiento de los poros (Bedbabis et al. 2014).

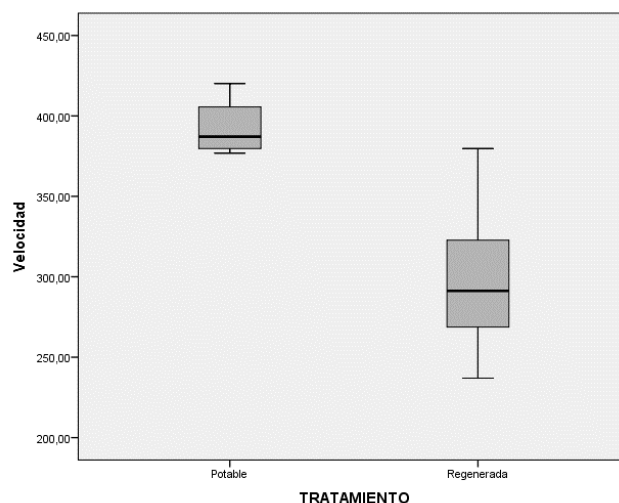


Fig. 4. Diagrama de cajas de las velocidades de infiltración (mm/h) en los dos tratamientos.

La disminución en la velocidad de infiltración en PGW\_AR no concuerda con la afirmación de que, por lo general, a mayor cantidad de vegetación, mayor es la velocidad de infiltración (Mujeriego, 1990). Ya que en este caso el riego con agua regenerada origina un incremento en la producción de biomasa en PGW\_AR y un mayor desarrollo radicular, que no provocan un aumento en la velocidad de infiltración.

Sin embargo, nuestros resultados difieren de los obtenidos por Abedi-Koupai et al. (2006), los cuales encontraron que, después de dos años de riego con agua regenerada en unas parcelas cultivadas con remolacha, maíz y girasol, la velocidad de infiltración fue mayor que en la parcela control, regada con agua de pozo. Al igual que Bedbabis et al. (2014), en el estudio de Abedi-Koupai et al (2006) se utilizó un infiltrómetro de anillo doble. Sus resultados muestran incluso que esta velocidad de infiltración aumentó ligeramente en la misma parcela AR después de la temporada de crecimiento del cultivo. Lo que viene a contrastar la afirmación de Mujeriego (1990) antes comentada.

### 3.2. Curvas de resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración del suelo con respecto a la profundidad para los ensayos en el año 2012 y 2016 se muestra en las Figuras 5 y 6, respectivamente. Se considera el año 2012 como punto inicial del estudio, ya que es a partir de ese año cuando comienza el riego con agua regenerada. En la Figura 5 se observa una tendencia similar para ambos tratamientos, mientras que la Figura 6, cuatro

años después del inicio del riego con agua regenerada, muestra una clara separación entre ambos tratamientos.

Asimismo, si se comparan las gráficas de ambos años, éstas muestran una clara diferencia, observándose, por lo general, valores de resistencia a la penetración mayores para el año 2016 en ambos tratamientos, sobre todo en los valores de profundidad más superficiales.

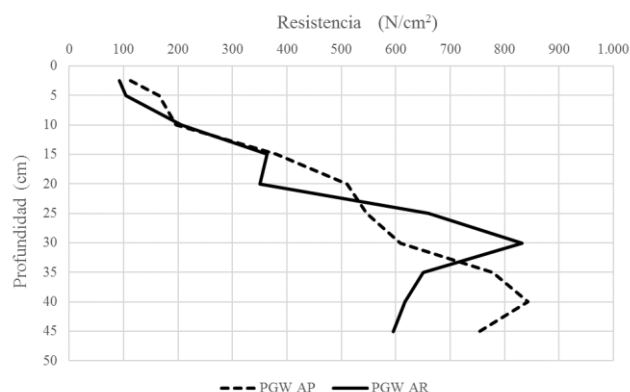


Fig. 5. Resistencia a la penetración en las parcelas PGW AP y AR (2012).

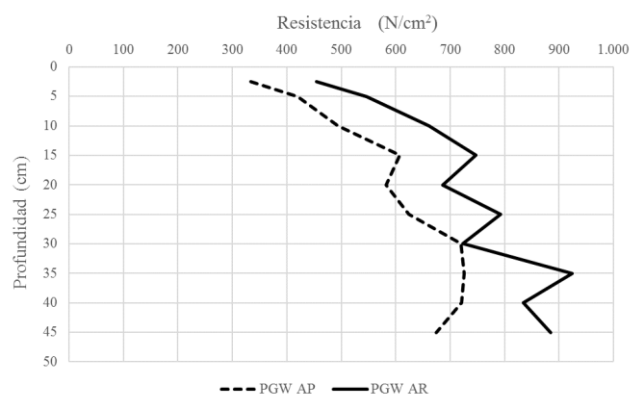


Fig. 6. Resistencia a la penetración en las parcelas PGW AP y AR (2016).

La Tabla 1 muestra los valores medios de resistencia a la penetración ( $N/cm^2$ ) para los diferentes tratamientos y años. A la hora de comparar los tratamientos, se ha considerado agrupar los datos según la profundidad: un espesor superficial (0-10 cm) más afectado por la zona radicular de las plantas y otro espesor más profundo (15-45 cm). En 2016 se encontraron diferencias significativas en la resistencia a la penetración entre tratamientos tanto para la profundidad de 0 a 10 cm como de 15-45 cm. Mientras que en 2012 sólo hubo diferencias significativas entre tratamientos para la profundidad de 0 a 10 cm.

Al comparar los resultados de los años 2012 y 2016, se observan diferencias significativas para ambas profundidades en el tratamiento AR, mientras que en AP sólo hubo diferencia para el espesor 0-10 cm. El aumento tan significativo que ocurre en el espesor más superficial, puede ser debido a un mayor desarrollo del sistema

radicular del césped en PGW\_AR especialmente y algo más ligeramente en PGW\_AP, lo que es consecuente con la mayor producción de biomasa en PGW\_AR. Aunque también puede indicar una mayor compactación del suelo (Demuner Molina et al. 2013). En el espesor más profundo existe una ligera diferencia entre el mismo tratamiento tras cuatro años de riego con agua regenerada, que no es significativa.

Tabla 1. Influencia del tipo de agua de riego en la resistencia a la penetración del suelo

Año	Tratamiento	Profundidad	Resistencia penetración ( $N/cm^2$ )	SD
2012	AP	0 – 10 cm	158 aA	77
		15 – 45 cm	601 aA	315
	AR	0 – 10 cm	138 bA	122
		15 – 45 cm	516 aA	316
2016	AP	0 – 10 cm	416 aB	164
		15 – 45 cm	655 aA	230
	AR	0 – 10 cm	554 bB	206
		15 – 45 cm	711 bB	190

Las letras minúsculas muestran diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los diferentes tratamientos para un mismo año, mientras que las mayúsculas muestran diferencias significativas entre el mismo tratamiento para diferentes años, de acuerdo con el test U de Mann-Whitney. Los análisis han comparado siempre el mismo rango de profundidades.

#### 4.- Conclusiones

Los resultados han demostrado que el riego con agua regenerada en parques urbanos modifica las características físicas del suelo. Este tipo de riego produce un descenso significativo en la velocidad de infiltración respecto a la parcela regada con agua potable, lo que puede estar causado por el alto contenido en sodio del agua regenerada, el cual provoca la dispersión de las arcillas con el consiguiente taponamiento de los poros. Asimismo, el uso de agua regenerada aumenta la resistencia a la penetración del suelo, posiblemente debido al aumento de la densidad radicular por la gran cantidad de biomasa generada por el riego con este tipo de agua.

**Agradecimientos.** Este trabajo se ha realizado gracias a los convenios de colaboración entre la Universidad de Alcalá y las empresas concesionarias del Ayuntamiento de Madrid para el servicio de riego y jardinería de zonas verdes, IMESAPI SA (2009-2013) y FCC (UTEs 5 y 6) (2014-2016). Agradecemos también al Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad (Dirección General de Gestión del Agua y Zonas Verdes) del Ayuntamiento de Madrid, por su mediación e interés para que este estudio de seguimiento haya sido llevado a efecto.

## 5.- Bibliografía

- Abedi Koupai, J. et al., 2006. Effect of treated wastewater on soil chemical and physical properties in an arid region. *Plant and Soil Environment*, 52(8), pp.335–344.
- AEMET, 2017. Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Recuperado de: <http://www.aemet.es/>
- Ali, H.M. et al., 2013. Performance of forest tree *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. under sewage effluent irrigation. *Ecological Engineering*, 61, pp.117–126.
- Asano, T. & Levine, A.D., 1996. Wastewater reclamation, recycling and reuse: Past, present, and future. *Water Science and Technology*, 33(10–11), pp.1–14.
- Ayuntamiento de Madrid, 2017. Recuperado de: <http://www.madrid.es/>
- Bagarello, V., Iovino, M., Palazzolo, E., Panno, M., Reynolds, W., 2006. Field and laboratory approaches for determining sodicity effects on saturated soil hydraulic conductivity. *Geoderma* 130, 1–13.
- Balairón, L., 2002. Gestión de recursos hídricos. *Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña*.
- Bedbabis, S. et al., 2014. Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate. *Journal of Environmental Management*, 133, pp.45–50.
- Biggs, T.W. & Jiang, B., 2009. Soil salinity and exchangeable cations in a wastewater irrigated area, India. *Journal of environmental quality*, 38, pp.887–896.
- Chen, W. et al., 2013. Impacts of long-term reclaimed water irrigation on soil salinity accumulation in urban green land in Beijing. *Water Resources Research*, 49(11), pp.7401–7410.
- Coppola, A. et al., 2004. Methodological approach for evaluating the response of soil hydrological behavior to irrigation with treated municipal wastewater. *Journal of Hydrology*, 292(1–4), pp.114–134.
- Custodio, E., Llamas, M.R., 1983. Hidrología subterránea. *Barcelona: Editorial Omega*.
- Demuner Molina, G., Cadena Zapata, M. & Campos Magaña, S.G., 2013. Resistencia a la penetración en un suelo franco arcilloso a dos años de manejo con tres sistemas de labranza. (Spanish). *Revista Ciencias Técnicas agropecuarias*, 22(Esp.), pp.68–71.
- Farahat, E. & Linderholm, H.W., 2015. The effect of long-term wastewater irrigation on accumulation and transfer of heavy metals in *Cupressus sempervirens* leaves and adjacent soils. *Science of the Total Environment*, 512–513, pp.1–7.
- Furumai, H., 2008. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33(5), pp.340–346.
- Han, X.M. et al., 2016. Impacts of reclaimed water irrigation on soil antibiotic resistance in urban parks of Victoria, Australia. *Environmental Pollution*, 211, pp.48–57.
- Hochstrat, R. et al., 2006. Assessing the European wastewater reclamation and reuse potential - A scenario analysis. *Desalination*, 188(1–3), pp.1–8.
- Iglesias Esteban, R. & Ortega de Miguel, E., 2008. Present and future of wastewater reuse in Spain. *Desalination*, 218(1–3), pp.105–119.
- Kim, H.K. et al., 2015. Impact of domestic wastewater irrigation on heavy metal contamination in soil and vegetables. *Environmental Earth Sciences*, 73(5), pp.2377–2383.
- Kirhensteine, I., Cherrier, V., Jarrit, N., Farmer, A., de Paoli, G., Delacamara, G. y Psomas, A., 2016. EU-level instruments on water reuse. Final report to support the Commission's Impact Assessment. *Luxemburgo: European Union*. doi:10.2779/974903.
- Lado, M. et al., 2012. Changes in chemical properties of semiarid soils under long-term secondary treated wastewater irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, 76, pp.1358–1369.
- Lado, M., Ben-Hur, M. & Assouline, S., 2005. Effects of Effluent Irrigation on Seal Formation, Infiltration, and Soil Loss during Rainfall. *Soil Science Society of America Journal*, 69(5), p.1432.
- Martínez-Pérez, S.; Martínez de Baroja, L. Ballesteros Olza, M; de la Torre Alcázar, M. y Sastre Merlín A., 2015. Evolución de la concentración de micronutrientes en el suelo y la vegetación de parques urbanos regados con agua regenerada: el caso de Madrid. *Estudios en la Zona No Saturada*, vol. XII, 173-178. Universidad de Alcalá.
- Mujeriego, R., 1990. Manual práctico de riego con agua residual municipal regenerada. *Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña*.
- Nouri, H. et al., 2013. Variability of drainage and solute leaching in heterogeneous urban vegetation environs. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11), pp.4339–4347.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C., 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. *Madrid: Ediciones Mundi-Prensa*
- Qian, Y.L. & Meham, B., 2005. Long-term effects of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties on golf course fairways. *Agronomy Journal*, 97(3), pp.717–721.
- San Diego City Council, 2017. Recuperado de: <https://www.sandiego.gov/water/recycled>
- Sastre Merlín, A. et al., 2016. Seguimiento de los efectos del riego con agua regenerada en varios parques de la ciudad de Madrid. En *Fundación Nueva Cultura del Agua*, ed. IX Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua. Valencia (España): Fundación Nueva Cultura del Agua, pp. 1052–1063.
- Sastre Merlín, A. et al., 2011. Seguimiento del riego de los parques urbanos de la ciudad de Madrid con agua regenerada: Estudio piloto en los parques del Oeste y Emperatriz María de Austria. En *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. Vol X*. Salamanca (España), pp. 289–294.
- SouDakouré, M.Y. et al., 2013. Impacts of irrigation with industrial treated wastewater on soil properties. *Geoderma*, 200–201, pp.31–39.
- USDA, 2001. Soil quality test kit guide. *Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture*. ed., Lincoln, NE and Washington, DC: pp. 82.
- Walker, C. & Lin, H.S., 2008. Soil property changes after four decades of wastewater irrigation: A landscape perspective. *Catena*, 73(1), pp.63–74.
- Yi, L. et al., 2011. An overview of reclaimed water reuse in China. *Journal of Environmental Sciences*, 23(10), pp.1585–1593.
- Zalacáin, D., Sastre, A., Martínez, S., 2016. El agua regenerada como recurso hídrico: El caso de España. En: *VI Jornadas de Jóvenes investigadores de la Universidad de Alcalá*. Alcalá de Henares (Madrid): Universidad de Alcalá.

